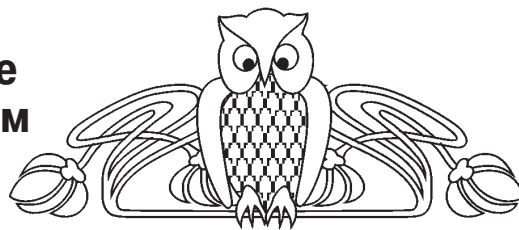




УДК 621.37

## Системы передачи информации с корреляционным приемом на базе генераторов с динамическим хаосом

В. И. Пономаренко, Е. Е. Лапшева, Е. В. Навроцкая,  
Ю. М. Ишбулатов, М. Д. Прохоров



Пономаренко Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра динамического моделирования и биомедицинской инженерии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского; ведущий научный сотрудник, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, [ponomarenkovi@gmail.com](mailto:ponomarenkovi@gmail.com)

Лапшева Елена Евгеньевна, старший преподаватель, кафедра информатики и программирования, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, [lapsheva@yandex.ru](mailto:lapsheva@yandex.ru)

Навроцкая Елена Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра динамического моделирования и биомедицинской инженерии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, [sidakev@gmail.com](mailto:sidakev@gmail.com)

Ишбулатов Юрий Михайлович, аспирант, кафедра динамического моделирования и биомедицинской инженерии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, [ishbulatov95@mail.ru](mailto:ishbulatov95@mail.ru)

Прохоров Михаил Дмитриевич, доктор физико-математических наук, профессор РАН, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, [mdprokhorov@yandex.ru](mailto:mdprokhorov@yandex.ru)

Объектом исследования являются системы передачи информации, основанные на методах корреляционного приема. Целью исследования является сравнительная оценка помехоустойчивости трех различных систем передачи информации при одних и тех же уровнях внешнего шума. Используются методы численного моделирования систем с запаздыванием. Для автоколебательных систем с запаздыванием использован подход, применяющийся в системах передачи информации на основе корреляционного приема. Показано, что принцип корреляционного приема, который используется в классических системах передачи информации, может быть использован и в том случае, когда в качестве опорных сигналов используются хаотические сигналы, генерируемые автоколебательными системами со сложным поведением. При этом помехоустойчивость такой системы связи приближается к помехоустойчивости классической системы передачи информации.

**Ключевые слова:** системы передачи информации, широкополосные сигналы, хаотическая несущая, корреляционный прием.

Поступила в редакцию: 21.04.2020 / Принята: 11.05.2020 /  
Опубликована: 31.08.2020

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-3-202-209>

### Введение

Гармонические колебания являются основой большинства современных систем передачи информации. Передаваемая информация в передатчике модулирует гармонические колебания по амплитуде, частоте или фазе, а в приемнике происходит обратный процесс – демодуляция. Для передачи информации можно использовать также хаотические сигналы, сгенерированные детерминированными генераторами хаоса. Возможности управления здесь значительно шире, поскольку хаотические колебания даже при небольших вариациях управляющих параметров и начальных условий демонстрируют существенно отличающееся поведение. Кроме того, хаотические сигналы являются широкополосными, и повышенный интерес к таким сигналам в радиотехнике традиционно связан с их большей информационной емкостью по сравнению с узкополосными колебаниями [1–6]. В то же время многие исследования свидетельствуют об относительно низкой помехоустойчивости систем передачи информации, основанных на синхронизации генераторов с хаотической динамикой [7–9].

В классических системах передачи информации широко используется метод корреляционного приема, который является также весьма привлекательным при использовании хаотической несущей и его идея используется в целом ряде работ по хаотической передаче информации [10–14]. Обычно считается, что из-за чувствительности к изменению начальных условий в приемнике нельзя построить точную копию сигнала передатчика, поскольку даже при задании близких начальных условий в приемнике и передатчике системы с динамическим хаосом



сначала эволюционируют по близким траекториям, а затем разбегаются в силу экспоненциальной расходимости и становятся совсем непохожи друг на друга. Поэтому один из принципов передачи информации на основе хаоса состоит в том, чтобы создать набор опорных функций (отрезков временного ряда, соответствующих символам передаваемого сигнала). Опорные функции известны в приемнике и передатчике, и в корреляционном приемнике происходит сравнение взаимной корреляции сигнала в канале связи и опорной функции. Решение о приеме того или иного символа зависит от того, с какой опорной функцией взаимная корреляция оказалась максимальной [15]. Однако развитие цифровых технологий позволяет идеально точно задавать начальные условия и создавать копию сигнала передатчика любой длины. Для этого достаточно использовать идентичные процедуры расчетов уравнений эволюции хаотического генератора в приемнике и передатчике, задавая при этом идентичные начальные условия. Построение копии сигнала передатчика в приемнике позволяет использовать стандартные схемы корреляционного приемника, разработанные для передачи информации с помощью простых детерминированных сигналов.

### 1. Описание метода

Одним из способов передачи двоичных сигналов в классических системах передачи информации является корреляционный прием, в частности реализованный в системах передачи с двоичной фазовой манипуляцией (binary phase

shift key (BPSK)) [16]. Принцип построения такой системы передачи информации проиллюстрирован на рис. 1. В передатчике сигнал  $s_1$  используется для кодирования логической 1, а сигнал  $s_2$  – для кодирования логического 0. Информационный сигнал  $m(t)$  управляет работой электронного ключа таким образом, что когда  $m(t) = 1$ , по каналу связи передается сигнал  $s_1$ , а когда  $m(t) = 0$ , по каналу связи передается сигнал  $s_2$ . В качестве опорных сигналов обычно используют синусоидальный сигнал с фазой 0 ( $s_1$ ) и с фазой  $\pi$  ( $s_2$ ). В приемнике верхняя и нижняя ветви схемы фактически находят взаимную корреляцию между передаваемым сигналом  $z(t)$  и опорными сигналами  $s_1$ ,  $s_2$  (проводится умножение при помощи умножителя, а затем сглаживание при помощи фильтров  $F_1$ ,  $F_2$ ). Если корреляция принятого сигнала  $z$  с опорным сигналом  $s_1$  выше, чем корреляция сигнала  $z$  с опорным сигналом  $s_2$ , то дискриминатор  $D$  принимает решение о том, что принята логическая 1. В противном случае дискриминатор  $D$  принимает решение о том, что принят логический 0. Таким образом, в приемнике формируется принятый информационный сигнал  $m'(t)$ .

Эта же структура системы передачи информации может быть использована в том случае, если опорные сигналы  $s_1$ ,  $s_2$  являются хаотическими сигналами. Эти хаотические сигналы генерируются в приемнике и передатчике при помощи идентичных цифровых процедур генерации хаотического сигнала. При этом для них идентичными являются параметры численных расчетов, начальные условия и управляющие

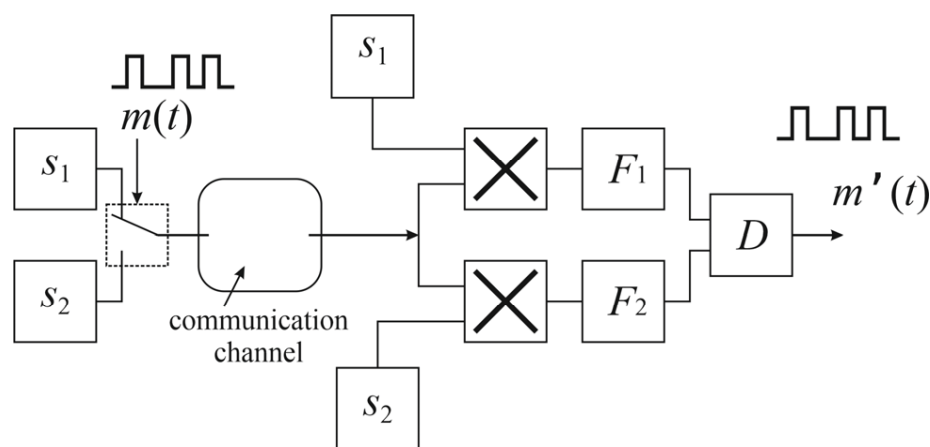


Рис. 1. Блок-схема классической системы передачи информации с корреляционным приемником:  $s_1$ ,  $s_2$  – опорные сигналы,  $F_1$ ,  $F_2$  – фильтры,  $D$  – дискриминатор

Fig. 1. Block diagram of a classical communication system with a correlation receiver, here  $s_1$  and  $s_2$  are reference signals,  $F_1$  and  $F_2$  are filters,  $D$  is a discriminator



параметры хаотической системы. Проиллюстрируем идею использования хаотических сигналов в качестве опорных на примере сигналов систем с запаздыванием. Кроме того, проведем сравнение помехоустойчивости классической системы передачи информации BPSK и системы с той же структурой, но основанной на передаче сигналов систем с динамическим хаосом.

В качестве хаотического генератора возьмем генератор с запаздывающей обратной связью, описываемый дифференциальным уравнением первого порядка с запаздыванием:

$$\varepsilon \dot{x}(t) = -x(t) + f(x(t - \tau)), \quad (1)$$

где  $\varepsilon = 6.7$  – параметр инерционности,  $\tau = 100$  – время запаздывания, нелинейная функция имеет вид  $f(x) = a \cdot \sin(x)$ ,  $a = 4$  – параметр нелинейности.

При этих значениях параметров в системе (1) наблюдается хаотическое поведение (рис. 2).

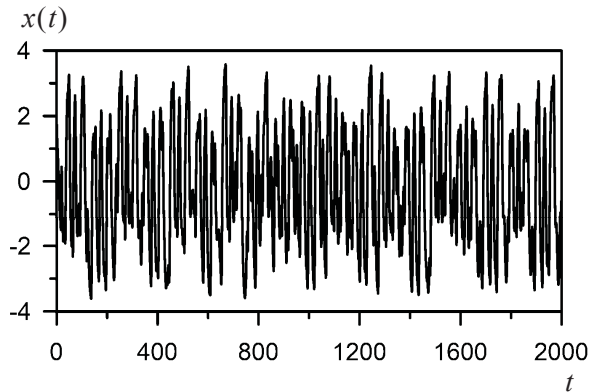


Рис. 2. Хаотический временной ряд системы с запаздыванием (1)

Fig. 2. Chaotic time series of the time-delay system (1)

Дисперсия сигнала равна примерно 3.7, среднее близко к нулю. Спектр сигнала имеет максимум на частоте, близкой к 0.025, что характерно для режимов, эволюционирующих на базе пятой гармоники основной моды системы с запаздыванием [17] с выбранным нами временем задержки.

## 2. Сравнение помехоустойчивости систем передачи информации

Проведем сравнение помехоустойчивости классической и двух хаотических схем передачи информации. В классической системе передачи информации сигналы  $s_1, s_2$  являются синусоидальными с фазами 0 и  $\pi$  соответственно. Информационный сигнал в передатчике переключает сигнал в канале связи. Если передается сигнал  $s_1$ , то это соответствует логической 1, а если

$s_2$  – логическому 0. Фактически информационный сигнал переключает знак сигнала задающего генератора, так что  $s_1$  соответствует логической 1, а  $s_2 = -s_1$  – логическому 0.

Первый вариант хаотической схемы предполагает наличие в передатчике хаотического сигнала от системы (1), так что  $s_1 = x(t)$ ,  $s_2 = -x(t)$ . В приемнике мы получаем копию сигнала передатчика, запуская цифровую копию генератора передатчика с тех же начальных условий, что и в передатчике. Дальнейшая обработка сигнала происходит точно так же, как и в классическом приемнике.

Второй вариант хаотической схемы – в передатчике имеется 2 цифровых генератора хаоса, параметры которых идентичны, а начальные условия различаются при генерации опорных сигналов  $s_1, s_2$ . В приемнике, зная начальные условия и параметры в передатчике, мы можем получить копии сигналов  $s_1, s_2$ . Обработка сигналов происходит так же, как и в первых двух схемах.

Шаг в численной схеме интегрирования уравнения (1) равен 1, с таким же шагом введено дискретное время в классической системе передачи информации. При выбранных параметрах хаотического генератора и шаге интегрирования количество точек на характерном периоде временного ряда оказывается около 40. Для всех трех систем связи будем находить количество ошибок при передаче информации по зашумленному каналу связи. При этом дисперсия синусоидального сигнала выбрана равной дисперсии хаотического сигнала, а частота синусоидального сигнала – близкой к основной частоте в спектре хаотического сигнала. Длина бита во всех случаях равна 400 условным единицам времени (шагам интегрирования).

На рис. 3 представлены временные ряды передаваемого  $m(t)$  и принимаемого  $m'(t)$  информационного сигнала, а также сигнала в канале связи для трех исследуемых систем. На рис. 3, а в моменты переключения информационного сигнала видны изменения фазы синусоидального сигнала. На рис. 3, б в моменты переключения также происходит изменение знака. На рис. 3, в в моменты переключения информационного сигнала происходит переключение с одной хаотической системы на другую.

Информационный сигнал  $m'(t)$ , выделяемый в приемнике, за счет фильтрации немного сдвинут относительно  $m(t)$ , что легко учесть, зная параметры фильтров приемника.

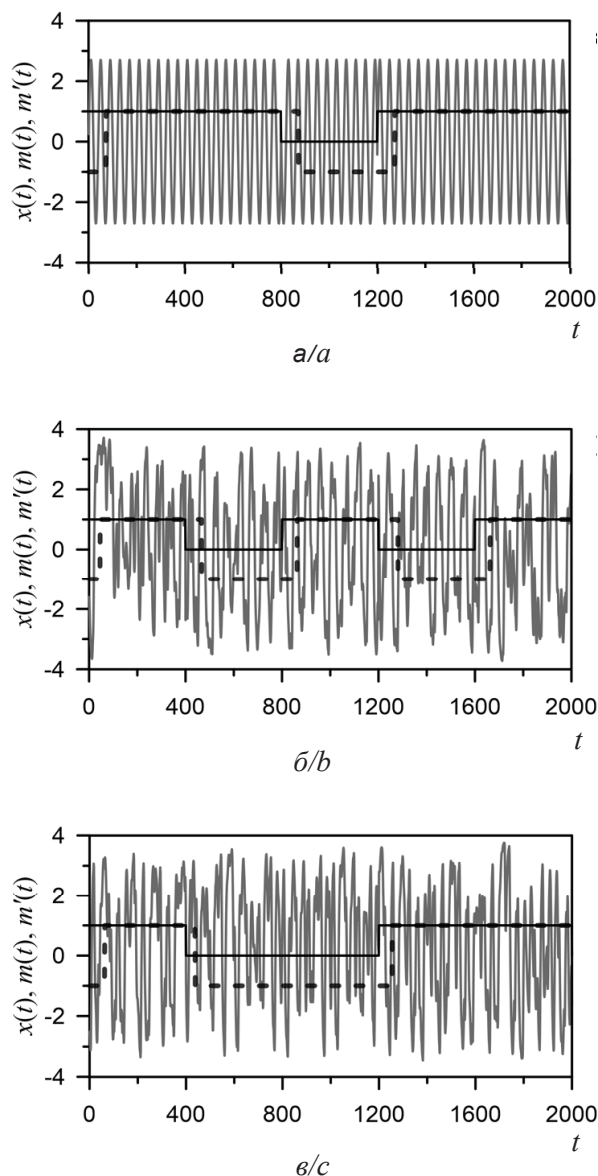


Рис. 3. Временные ряды передаваемого  $m(t)$  (черный цвет) и принимаемого  $m'(t)$  (пунктир) информационного сигнала, а также сигнала в канале связи (серый цвет) для трех исследуемых систем передачи информации: классической (а), хаотической с изменением знака передаваемого сигнала (б) и хаотической с различными начальными условиями (в)

Fig. 3. Time series of the transmitted information signal  $m(t)$  (black), the received information signal  $m'(t)$  (dashed line), and the signal in the communication channel (gray) for the three studied communication systems: the classical system (a), a chaotic system with a change in the sign of the transmitted signal (b) and a chaotic system with different initial conditions (c)

Рис. 4 иллюстрирует устойчивость предложенного метода передачи информации к шумам в канале связи. Здесь представлены временные ряды передаваемого  $m(t)$  и принимаемого  $m'(t)$

информационного сигнала, а также сигнала в канале связи для хаотической системы с различными начальными условиями при добавлении в канал связи нормального шума с дисперсией, равной дисперсии сигнала в канале связи.

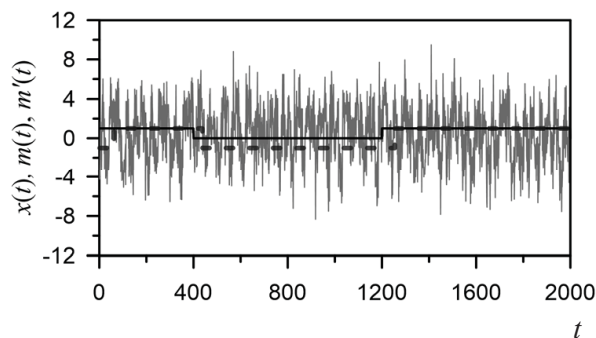


Рис. 4. Временные ряды передаваемого  $m(t)$  (черный цвет) и принимаемого  $m'(t)$  (пунктир) информационного сигнала, а также сигнала в канале связи (серый цвет) для хаотической системы с различными начальными условиями при добавлении шума

Fig. 4. Time series of the transmitted information signal  $m(t)$  (black), the received information signal  $m'(t)$  (dashed line), and the signal in the communication channel (gray) for a chaotic system with different initial conditions when adding noise

Видно, что за счет добавления шума амплитуда сигнала в канале связи стала существенно выше, но информационный сигнал практически не изменился.

Нами было проведено сравнительное исследование помехоустойчивости всех трех рассмотренных систем передачи информации. Для цифровых систем передачи информации обычно строят зависимость битовой ошибки (Bit Error Rate, BER) от величины  $E_b/N_0$ , которая представляет собой отношение энергии бита  $E_b$  к энергии шума  $N_0$  в полосе приема [16]. На рис. 5 представлена зависимость BER от  $E_b/N_0$  для классической схемы передачи информации и двух схем хаотической передачи информации.

Видно, что помехоустойчивость хаотической системы с изменением знака передаваемого сигнала близка к помехоустойчивости классической схемы, а помехоустойчивость хаотической системы, в которой для генерации сигналов  $s_1, s_2$  задаются различные начальные условия, несколько уступает помехоустойчивости классической схемы. Несмотря на это, предложенные в статье хаотические схемы связи имеют преимущество в том, что обладают некоторой степенью конфиденциальности. При этом для того чтобы перехватить сообщение, неавторизованный поль-

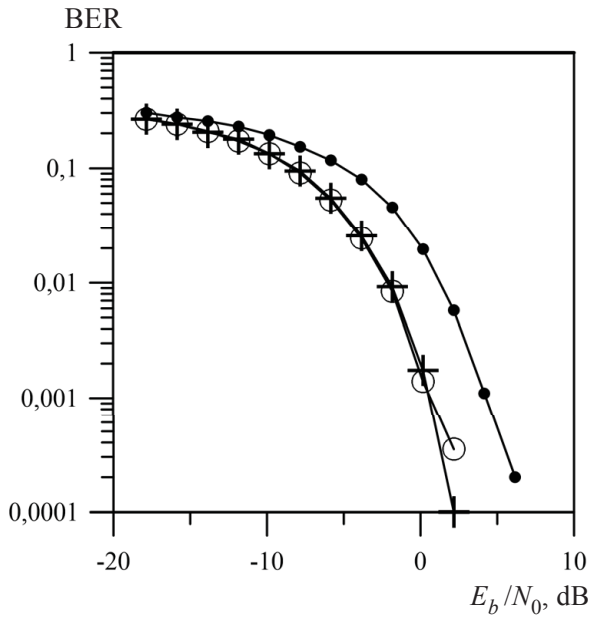


Рис. 5. Зависимость BER от  $E_b/N_0$  для классической системы передачи информации (окружности), хаотической системы связи с изменением знака передаваемого сигнала (крестики) и хаотической схемы связи с различными начальными условиями (точки)

Fig. 5. BER dependence on  $E_b/N_0$  for the classical communication system (circle), a chaotic communication system with a change in the sign of the transmitted signal (crosses), and a chaotic communication system with various initial conditions (points)

зователь должен знать не только управляющие параметры генераторов [18, 19], но и начальные условия автогенераторов в передатчике.

Отметим, что другие хаотические системы передачи информации, основанные на эффекте хаотической синхронизации или нелинейном подмешивании, имеют еще меньшую помехоустойчивость [20, 21].

### Заключение и обсуждение

В работе показано, что идеология корреляционного приема, на которой построены классические системы передачи информации, может быть использована и в том случае, когда в качестве опорных сигналов используются хаотические сигналы, генерируемые автоколебательными системами со сложным поведением. При этом помехоустойчивость хаотической системы с изменением знака передаваемого сигнала приближается к помехоустойчивости классической системы передачи информации с наилучшими характеристиками помехоустойчивости. В то же время помехоустойчивость хаотической схемы

связи с различными начальными условиями несколько хуже. По-видимому, это связано с тем, что даже при различных начальных условиях существуют отрезки времени, на которых временные ряды хаотических систем, имеющих одинаковые управляющие параметры, но различные начальные условия, становятся близкими. Это приводит к тому, что при некотором уровне аддитивного шума наблюдаются ошибки приема зашумленного сигнала.

Физическая реализация систем передачи информации с хаотической несущей возможна при использовании чисто цифровых технологий для формирования хаотической несущей. При этом все расчеты проводятся внутри цифровой схемы с использованием заранее заданных начальных условий, в канал связи подается аналоговый сигнал, полученный с выхода цифровой схемы при помощи ЦАП. В приемнике сигнал из канала связи оцифровывается при помощи АЦП и сравнивается с цифровой копией сигнала, генерируемого цифровой схемой с заранее известными начальными условиями, такими же, как в передатчике. Наиболее дешёвый вариант – использование микроконтроллеров. Частотный диапазон такого варианта – от единиц до десятков мегагерц. Использование сигнальных процессоров позволяет продвинуться в диапазон десятков – сотен мегагерц. Наконец, применение топовых программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) совместно с топовыми высокоскоростными АЦП и ЦАП позволяет использовать диапазон до 1 ГГц.

Серьезной проблемой для хаотических систем передачи информации, предложенных в данной работе, является также проблема синхронизации приемника и передатчика. Необходимо синхронизировать начало генерации опорного сигнала в приемнике, чтобы он соответствовал опорному сигналу, сгенерированному в передатчике и затем принятому приемником после прохождения по каналу связи. Кроме того, на всем протяжении сеанса связи опорные сигналы в приемнике и передатчике должны быть идентичными. Если при генерации использовать кварцевый генератор, то точность воспроизведения тактовой частоты в приемнике будет порядка  $10^{-6}$ . Если полагать, что расхождение сигналов передатчика и приемника должно быть не более четверти характерного периода, то это примерно  $2.5 \cdot 10^4$  бит, после чего необходимо синхронизировать приемник и передатчик, либо запустить процесс заново.



Ожидается, что конфиденциальность исследованных методов передачи информации с помощью хаотической несущей будет, по крайней мере, не хуже, чем для систем связи с переключением хаотических режимов, которые стали одним из эталонов в хаотической передаче информации. Существенным отличием предложенных систем связи от известных может быть то, что параметры хаотической системы в передатчике могут оставаться неизменными, что затрудняет для неавторизованного пользователя реконструкцию сигнала, основанную на оценке параметров передающей системы. В то же время помехоустойчивость рассмотренных методов передачи информации существенно лучше.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-07-00205 (в части исследования помехоустойчивости хаотических систем передачи информации с корреляционным приемом) и в рамках государственного задания (в части разработки систем скрытой передачи информации).

### Список литературы

1. Андреев Ю. В., Гуляев Ю. В., Кузьмин Л. В., Дмитриев А. С., Ефремова Е. В., Кузьмин Л. В., Лазарев В. А., Рыжов А. И., Мохсени Т. И. Процессы передачи и обработки информации в системах со сложной динамикой / под ред. А. С. Дмитриева, Е. В. Ефремовой. М.: Техносфера, 2019. 320 с.
2. Короновский А. А., Москаленко О. И., Храмов А. Е. О применении хаотической синхронизации для скрытой передачи информации // Успехи физических наук. 2009. Т. 179, № 12. С. 1281–1310. DOI: 10.3367/UFNr.0179.200912c.1281
3. Ren H.-P., Bai C., Liu J., Baptista M. S., Grebogi C. Experimental validation of wireless communication with chaos // Chaos. 2016. Vol. 26. 083117. DOI: 10.1063/1.4960787
4. Кульминский Д. Д., Пономаренко В. И., Караваев А. С., Прохоров М. Д. Устойчивая к шумам система скрытой передачи информации на хаотическом генераторе с запаздыванием с переключаемым временем задержки // Журнал технической физики. 2016. Т. 86, вып. 5. С. 1–8.
5. Yao J.-L., Li C., Ren H.-P., Grebogi C. Chaos-based wireless communication resisting multipath effects // Physical Review E. 2017. Vol. 96. 032226. DOI: 10.1103/PhysRevE.96.032226
6. Carroll T. L. Chaos for low probability of detection communications // Chaos, Solitons & Fractals. 2017. Vol. 103. P. 238–245. DOI: 10.1016/j.chaos.2017.06.011
7. Kolumban G., Kennedy M. P. The role of synchronization in digital communication using chaos-part II : Chaotic modulation and chaotic synchronization // IEEE Trans. on Circuits and Systems – I: Fundamental Theory and Applications. 1998. Vol. 45, № 11. P. 1129–1140.
8. Tao Y. A survey of chaotic secure communication systems // Intern. J. Comput. Cogn. 2004. Vol. 2, № 2. P. 81–130.
9. Wang M., Wang X., Pei B. A new digital communication scheme based on chaotic modulation // Nonlinear Dynamics. 2012. Vol. 67. P. 1097–1104. DOI: 10.1007/s11071-011-0053-z
10. Kolumban G., Kennedy M. P. The role of synchronization in digital communication using chaos-part III : Performance bounds for correlation receivers // IEEE Trans. on Circuits and Systems – I: Fundamental Theory and Applications. 2000. Vol. 47, № 12. P. 1673–1683.
11. Капранов М. В., Томашевский А. И. Система скрытой связи с использованием корреляционного приема и синхронного хаотического отклика // Электромагнитные волны и электронные системы. 2003. Т. 8, № 3. С. 35–48.
12. Rohdea G. K., Nichols J. M., Bucholtz F. Chaotic signal detection and estimation based on attractor sets : Applications to secure communications // Chaos. 2008. Vol. 18. 013114. DOI: 10.1063/1.2838853
13. Corron N. J., Blakely J. N., Stahl M. T. A matched filter for chaos // Chaos. 2010. Vol. 20. 023123. DOI: 10.1063/1.3432557
14. Carroll T. L., Rachford F. J. Chaotic sequences for noisy environments // Chaos. 2016. Vol. 26. 103104. DOI: 10.1063/1.4964348
15. Prokhorov M. D., Ponomarenko V. I., Kulminskiy D. D., Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., Hramov A. E. Resistant to noise chaotic communication scheme exploiting the regime of generalized synchronization // Nonlinear Dynamics. 2017. Vol. 87, № 3. P. 2039–2050. DOI: 10.1007/s11071-016-3174-6
16. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / изд. 2-е, испр. ; пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1004 с.
17. Ikeda K., Matsumoto K. High-dimensional chaotic behavior in systems with time-delayed feedback // Physica D. 1987. Vol. 29. P. 223–235. DOI: 10.1016/0167-2789(87)90058-3
18. Пономаренко В. И., Навроцкая Е. В., Кульминский Д. Д., Прохоров М. Д. Оценка конфиденциальности системы передачи информации на основе хаотического генератора с запаздыванием и переключаемым временем задержки // Информационно-управляющие системы. 2019. № 4. С. 54–61. DOI: 10.31799/1684-8853-2019-4-54-61
19. Hou T. T., Yi L. L., Yang X. L., Ke J. X., Hu Y., Yang Q., Zhou P., Hu W. S. Maximizing the security of cha-



otic optical communications // Optics Express. 2016. Vol. 24, № 20. 23439. DOI: dx.doi.org/10.1364/OE.24.023439

20. Чуб Р. О., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д. Способ передачи информации с использованием предсказательной модели в связанных системах с запазды-

ванием // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2018. Т. 18, вып. 2. С. 84–91. DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-84-91

21. Дмитриев А. С., Панас А. И. Динамический хаос : новые носители информации для систем связи. М. : Физматлит, 2002. 252 с.

#### Образец для цитирования:

Пonomаренко В. И., Лашева Е. Е., Навроцкая Е. В., Ишбулатов Ю. М., Прохоров М. Д. Системы передачи информации с корреляционным приемом на базе генераторов с динамическим хаосом // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2020. Т. 20, вып. 3. С. 202–209. DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-3-202-209>

#### Communication Systems with Correlation Receiver Based on Generators with Dynamical Chaos

V. I. Ponomarenko, E. E. Lapsheva, E. V. Navrotskaya, Yu. M. Ishbulatov, M. D. Prokhorov

Vladimir I. Ponomarenko, <https://orcid.org/0000-0002-1579-6465>, Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 38 Zelyonaya St., Saratov 410019, Russia, [ponomarenkovi@gmail.com](mailto:ponomarenkovi@gmail.com)

Elena E. Lapsheva, <https://orcid.org/0000-0001-6632-1083>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, [lapsheva@yandex.ru](mailto:lapsheva@yandex.ru)

Elena V. Navrotskaya, <https://orcid.org/0000-0002-1649-440X>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, [sidakev@gmail.com](mailto:sidakev@gmail.com)

Yurii M. Ishbulatov, <https://orcid.org/0000-0003-2871-5465>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, [ishbulatov95@mail.ru](mailto:ishbulatov95@mail.ru)

Mikhail D. Prokhorov, <https://orcid.org/0000-0003-4069-9410>, Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 38 Zelyonaya St., Saratov 410019, Russia, [mdprokhorov@yandex.ru](mailto:mdprokhorov@yandex.ru)

**Background and Objectives:** The object of research is communication systems based on the methods of correlation receiving. The aim of the study is a comparative assessment of the noise immunity of three different information transmission systems at the same levels of external noise. **Materials and Methods:** The methods of numerical simulation of time-delay systems are used. For the self-oscillating systems with delay, the approach based on correlation receiving is used for communication systems. **Results:** It is shown that the principle of correlation receiver, which is applied in classical communication systems, can also be used in the case when chaotic signals generated by self-oscillating systems with complex behavior are taken as reference signals. **Conclusion:** The noise immunity of the communication system based on the methods of correlation receiving and dynamical chaos is close the noise immunity of a classical communication system.

**Keywords:** information transmission systems, broadband signals, chaotic carrier, correlation reception.

Received: 21.04.2020 / Accepted: 11.05.2020 / Published: 31.08.2020

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

*Acknowledgements:* This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 18-07-00205 (problem of the study of noise immunity of chaotic communication systems with correlation receiver) and within the framework of the state task (problem of the development of systems for hidden data transmission).

#### References

1. Andreev Yu. V., Gulyaev Yu. V., Kuzmin L. V., Dmitriev A. S., Efremova E. V., Kuzmin L. V., Lazarev V. A., Ryzhov A. I., Mokhseni T. I. *Processy peredachi i obrabotki informatsii v sistemakh so sloznoi dinamiko* [Processes of information transmission and processing in systems with complex dynamics]. A. S. Dmitriev, E. V. Efremova, eds. Moscow, Technosfera Publ., 2019. 320 p. (in Russian).
2. Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., Hramov A. E. On the use of chaotic synchronization for secure communication. *Physics – Uspekhi*, 2009, vol. 52, pp. 1213–1238. DOI: 10.3367/UFNe.0179.200912c.1281
3. Ren H.-P., Bai C., Liu J., Baptista M. S., Grebogi C. Experimental validation of wireless communication with chaos. *Chaos*, 2016, vol. 26, 083117. DOI: 10.1063/1.4960787
4. Kul'minskii D. D., Ponomarenko V. I., Karavaev A. S., Prokhorov M. D. Noise-Resistant System of Concealed Information Transfer on a Chaotic Delayed Feedback Oscillator with Switchable Delay Time. *Technical Physics*, 2016, vol. 61, no. 5, pp. 639–647. DOI: 10.1134/S1063784216050121
5. Yao J.-L., Li C., Ren H.-P., Grebogi C. Chaos-based wireless communication resisting multipath effects. *Physical Review E*, 2017, vol. 96, 032226. DOI: 10.1103/PhysRevE.96.032226
6. Carroll T. L. Chaos for low probability of detection communications, *Chaos, Solitons & Fractals*, 2017, vol. 103, pp. 238–245. DOI: 10.1016/j.chaos.2017.06.011



7. Kolumban G., Kennedy M. P. The role of synchronization in digital communication using chaos-part II: Chaotic modulation and chaotic synchronization. *IEEE Trans. On Circuits and Systems – I: Fundamental Theory and Applications*, 1998, vol. 45, no. 11, pp. 1129–1140.
8. Tao Y. A survey of chaotic secure communication systems. *Int. J. Comput. Cogn.*, 2004, vol. 2, no. 2, pp. 81–130.
9. Wang M., Wang X., Pei B. A new digital communication scheme based on chaotic modulation. *Nonlinear Dynamics*, 2012, vol. 67, pp. 1097–1104. DOI: 10.1007/s11071-011-0053-z
10. Kolumban G., Kennedy M. P. The role of synchronization in digital communication using chaos-part III: Performance bounds for correlation receivers. *IEEE Trans. On Circuits and Systems – I: Fundamental Theory and Applications*, 2000, vol. 47, no. 12, pp. 1673–1683.
11. Kapranov M. V., Tomashevskiy A. I. System of hidden communication using correlation receiver and synchronous chaotic response. *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, 2003, vol. 8, no. 3, pp. 35–48 (in Russian).
12. Rohdea G. K., Nichols J. M., Bucholtz F. Chaotic signal detection and estimation based on attractor sets: Applications to secure communications. *Chaos*, 2008, vol. 18, 013114. DOI: 10.1063/1.2838853
13. Corron N. J., Blakely J. N., Stahl M. T. A matched filter for chaos. *Chaos*, 2010, vol. 20, 023123. DOI: 10.1063/1.3432557
14. Carroll T. L., Rachford F. J. Chaotic sequences for noisy environments. *Chaos*, 2016, vol. 26, 103104. DOI: 10.1063/1.4964348
15. Prokhorov M. D., Ponomarenko V. I., Kulminskiy D. D., Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., Hramov A. E. Resistant to noise chaotic communication scheme exploiting the regime of generalized synchronization. *Nonlinear Dynamics*, 2017, vol. 87, no. 3, pp. 2039–2050. DOI: 10.1007/s11071-016-3174-6
16. Sklar B. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. 2nd ed. Los Angeles, University of California, 2001. 1104 p.
17. Ikeda K., Matsumoto K. High-dimensional chaotic behavior in systems with time-delayed feedback. *Physica D*, 1987, vol. 29, pp. 223–235. DOI: 10.1016/0167-2789(87)90058-3
18. Ponomarenko V. I., Navrotskaya E. V., Kul'minskii D. D., Prokhorov M. D. Estimation of confidentiality of a communication system based on chaotic time-delay generator with switchable delay time. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 54–61 (in Russian). DOI: 10.31799/1684-8853-2019-4-54-61
19. Hou T. T., Yi L. L., Yang X. L., Ke J. X., Hu Y., Yang Q., Zhou P., Hu W. S. Maximizing the security of chaotic optical communications. *Optics Express*, 2016, vol. 24, no. 20, 23439. DOI: 10.1364/OE.24.023439
20. Chub R. O., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. Method for information transmission using a predictive model in coupled time-delay systems. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2018, vol. 18, iss. 2, pp. 84–91 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-84-91
21. Dmitriev A. S., Panas A. I. *Dinamicheskii haos: novye nositeki informatsii dlya sistem svyazi* [Dynamic chaos: new storage media for communication systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002. 252 p. (in Russian).

---

**Cite this article as:**

Ponomarenko V. I., Lapsheva E. E., Navrotskaya E. V., Ishbulatov Yu. M., Prokhorov M. D. Communication Systems with Correlation Receiver Based on Generators with Dynamical Chaos. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2020, vol. 20, iss. 3, pp. 202–209 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-3-202-209>

---